

基于裂纹扩展的两级加载下的疲劳-蠕变寿命预测

于 强

(四川理工学院理学院, 四川 自贡 643000)

摘 要:取加载一个周期内拉应力作用下的应变能密度增量为材料的损伤变量,由迟滞回线所围面积导出了该损伤变量的计算式;依据材料被损伤会使裂纹扩展,裂纹的扩展会导致试件发生断裂的事实,以J积分为裂纹扩展的控制参量,将裂纹扩展看作纯疲劳损伤与蠕变损伤二者共同的贡献,考虑疲劳-蠕变的交互作用,导出了在两级应力加载下的疲劳-蠕变寿命的表达式;该表达式与加载的波形、材料的疲劳-蠕变速率相关。应用该表达式对 316L 钢在 550 °C 两级应力梯形波加载下的疲劳-蠕变寿命进行了预测,预测值在 1.5 倍误差因子以内,预测精度较高。

关键词:应变能密度;两级载荷;裂纹扩展;疲劳-蠕变;寿命预测

中图分类号: O346.2

文献标志码: A

引 言

高温下的构件一般是处于疲劳-蠕变的工作状态,其寿命与温度、材料、应力、应变、保载时间、蠕变、加载速率、环境等多种因素相关,应力梯形波是高温构件的典型加载波形。近 20 多年来,国内外对单级加载已经有了多种有效的疲劳-蠕变寿命的预测模型,即将常温中广为应用的 Manson-Coffin 寿命预测公式进行修正后应用于高温状态,得到了应变能划分与损伤线性累积结合的模型^[1]、连续损伤力学模型^[2]、延性耗竭与损伤力学结合的模型^[3]、疲劳损伤与蠕变损伤划分^[4]等多种模型,这些研究多数都是用实验拟合出某一宏观控制参量与材料寿命之间关系的唯象模型,其优点是公式较为简单,易于工程操作,缺点是寿命预测精度不够高,不能够描述加载波形及多种损伤因素对寿命的影响,对材料损伤直至断裂的微观物理过程描述也不够清晰。迄今为止,对两级及更多级加载水平的疲劳-蠕变寿命预测的文献很少,对单级加载研究的不足之处同样存在与多级加载之中。本文从循环过程中材料被损伤会发生裂纹扩展,裂纹的扩展会导致试件断裂的角度出发,力图建

立一个物理过程清晰、能够考虑多种损伤因素,寿命预测的精度较高的两级加载水平的疲劳-蠕变寿命预测模型。

1 有效应变能密度增量计算

1.1 应力梯形波加载下的有效应变能密度增量

应力梯形波是应力控制加载的典型波形,其应力与时间的关系如图 1 所示。

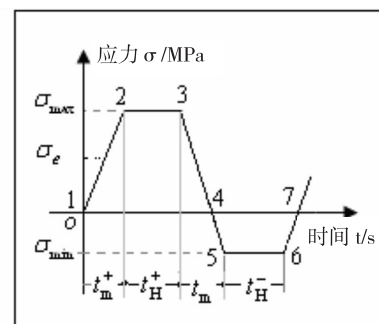


图 1 应力梯形波波形示意图

图 1 中,一个周期加载的最大应力 σ_{\max} 保持时间为 t_H^+ , 最小应力 σ_{\min} 保持时间为 t_H^- , 拉应力加、卸载时间为

收稿日期:2014-03-03

作者简介:于强(1956-),男,山东泰安人,讲师,主要从事金属疲劳方面的研究,(E-mail)470106760@qq.com

t_m^+ , 压应力加、卸载时间为 t_m^- 。由于在一个循环过程中材料所吸收的应变能密度值等于迟滞回线所围的面积, 其值与加载的众多因素相关, 是较理想的损伤变量, 又因拉应力会使裂口张开并扩展, 则设一个循环中拉应力作用下材料吸收的应变能密度为有效应变能密度增量 ΔW_t , 其值应等于迟滞回线的正值面积。这一面积可以划分为纯疲劳和蠕变两部分, 分别对应纯疲劳的有效应变能密度增量值 ΔW_p 和蠕变有效应变能密度增量值 ΔW_c , 则有 $\Delta W_t = \Delta W_p + \Delta W_c$ 。在应力梯形波加载下的有效应变能密度增量如图 2 所示。

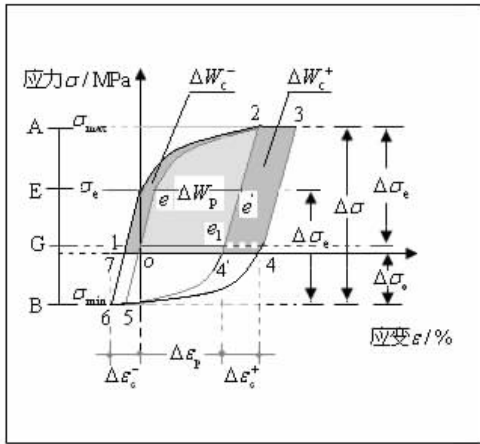


图 2 一个周期的有效应变能密度增量示意图

图 2 中, 一个周期的迟滞回线图形外围轮廓线面积等于该周期中材料吸收的应变能密度增量, 其中仅拉应力作用的正值面积才是使裂纹扩展的有效面积 ΔW_t , 图 2 中绿色部分面积为纯疲劳的 ΔW_p , 灰色部分面积为蠕变的 ΔW_c , 若零应力点 O 的位置 $\Delta\sigma_o = 0 - \sigma_{\min}$ 不同, 则有效面积值不同。

1.2 纯疲劳的有效应变能密度增量

纯疲劳的有效应变能密度增量值即图 2 中的绿色部分的面积。该面积的轮廓线 $O-e$ 段为加载的弹性变形段, $e-2$ 段非弹性变形段, 非弹性应变计算式为:

$$\Delta\epsilon_p = [(\sigma_{\max} - \sigma_e)/K']^{\frac{1}{n'}} \quad (1)$$

其中, σ_{\max} 为最大应力, σ_e 为循环弹性极限, 考虑压应力会改变循环弹性极限值, 则取^[5] $\sigma_e = \sigma_{\max} - \sqrt{\sigma_{\max}\Delta\sigma}/2$, n' 为循环应变硬化指数, K' 为循环强度系数。该面积轮廓线的 $2-e_1$ 段为卸载的弹性变形段, e_1-5 段为卸载和压应力的非弹性变形段(与 $e-2$ 段近似对称)。绿色部分的面积的上部分($e-2-e'-e$)为曲边形, 下部分($O-e-e'-e_1-O$)近似为平行四边形, 由此可导出绿色部分的面积为(其推导较长而省略):

$$\Delta W_p = \alpha_p \Delta\sigma \Delta\epsilon_p \quad (2)$$

其中, 最大应力范围 $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ 。

式(2)中系数 α_p 随着零应力点 O 的位置而变化。当最小应力 $\sigma_{\min} \geq 0$ 时, 绿色面积达到最大, 推导出的系数为:

$$\alpha_p = (1 - n' + 2n'\alpha_e)/(1 + n') \quad (3)$$

其中, $\alpha_e = \Delta\sigma_e/\Delta\sigma$, 弹性极限范围为 $\Delta\sigma_e = \sigma_e - \sigma_{\min}$ 。

当 $\sigma_{\min} < 0$ 时, 零应力点 O 位置可能在图 2 中的 AE, EG, GB 三个区域中:

(1) O 点在 EG 区中, 即当 $\Delta\sigma - \Delta\sigma_e \leq \Delta\sigma_o \leq \Delta\sigma_e$ 时, 导出系数:

$$\alpha_p = (\sigma_{\max} + n'\sigma_e)/[\Delta\sigma(1 + n')] \quad (4)$$

(2) O 点在 AE 区中, 即 $\Delta\sigma_o \geq \Delta\sigma_e$ 时, 有:

$$\alpha_p = \left(\frac{1 + n'x}{1 + n'} - x^{\frac{n'+1}{n'}}\right)(1 - \alpha_e) \quad (5)$$

$$x = [\alpha_m \alpha_e (1 - \alpha_e)^{-1}]^{\frac{n'}{n'+1}} \quad (6)$$

$$\alpha_m = \sigma_{\max}/\Delta\sigma \quad (7)$$

(3) O 在 GB 区中, 即 $\Delta\sigma_o \leq \Delta\sigma - \Delta\sigma_e$ 时,

$$\alpha_p = \frac{1 - n' + 2n'\alpha_e}{1 + n'} - \left(\frac{1 + n'x}{1 + n'} - x^{\frac{n'+1}{n'}}\right)(1 - \alpha_e) \quad (8)$$

因此, 当 σ_{\max} 、 σ_{\min} 、 n' 、 K' 给定后, 即可由(2)式很方便地计算出 ΔW_p 值。

1.3 蠕变的有效应变能密度增量

在等腰梯形应力波加载下, 由于拉应力会产生蠕变应变并耗能, 压应力会使已发生的蠕变恢复以及产生压缩蠕变并耗能, 二者都会使迟滞回线所围面积沿应变方向的尺寸增大, 其面积也相应增大, 蠕变有效应变能密度的增量约等于图 2 图形中的两块灰色面积。

(1) 在一个周期中加、卸载期内拉应力产生的蠕变应变能密度增量的计算式为:

$$\Delta W_m^+ = 2 \int_0^{t_m^+} \sigma(t) \dot{\epsilon}_c dt \quad (9)$$

其中, $\sigma(t) = \dot{\sigma}t$ 为加载拉应力, $\dot{\sigma}$ 为加载速率, t 为时间, 拉应力的加载时间 $t_m^+ = \sigma_{\max}/\dot{\sigma}$; 循环蠕变应变二阶段速率 $\dot{\epsilon}_c = \beta k \sigma^n(t)$ ^[6], 在最大应力 σ_{\max} 时为 $\dot{\epsilon}_{ca}^+ = \beta k \sigma_{\max}^n$, 在最小应力时为 $\dot{\epsilon}_{ca}^- = \beta k \sigma_{\min}^n$, β 是试件静蠕变与疲劳蠕变寿命的比值, k 和 n 是静蠕变应力指数和应力系数。由(9)式积出:

$$\Delta W_m^+ = 2t_m^+ \sigma_{\max} \dot{\epsilon}_{ca}^+ / (n + 2) \quad (10)$$

上保载期的循环蠕变应变能密度增量为:

$$\Delta W_H^+ = \sigma_{\max} \dot{\epsilon}_{ca}^+ t_H^+ \quad (11)$$

(2) 压应力产生的蠕变使迟滞回线面积会增大^[7], 设相应的有效应变能密度增量为:

$$\Delta W_{mH} \approx \sigma_{\max} (\Delta\epsilon_m^- + \Delta\epsilon_H^-) \quad (12)$$

则一个周期的有效蠕变应变能密度增量为式(10~12)三项之和,即:

$$\Delta W_c = \Delta W_m^+ + \Delta W_H^+ + \Delta W_{mH} = \chi_c \varepsilon_{ca}^+ \sigma_{\max} \quad (13)$$

其中系数 χ_c 为:

$$\chi_c = \frac{2\sigma_{\max}}{(n+2)\bar{\sigma}} + \frac{2\sigma_{\min}R^n}{(n+1)\bar{\sigma}} + t_H^+ + t_H^- R^n \quad (14)$$

(3) 一个周期的循环蠕变速率 $\dot{\varepsilon}_{cc}$ 是指相邻两个循环迟滞回线图形中心距离,用于描述试件在一次循环中发生的循环蠕变应变,是实验中常测量的物理量。由于拉应力产生的蠕变使迟滞回线的中心沿应变增大方向移动,而压应力的蠕变回复使迟滞回线的中心沿应变减小方向移动,则一个周期 T 内的迟滞回线的中心沿应变增大方向移动总量为拉和压应力产生的蠕变应变的代数和,则计算如下:

由在加卸、载中产生的蠕变应变:

$$\Delta \varepsilon_m^{\pm} = 2 \int_0^{t_c} \dot{\varepsilon}_c dt = 2 \int_0^{t_c} \beta K \sigma(t)^n dt \quad (15)$$

积出在拉应力时:

$$\Delta \varepsilon_m^+ = \frac{2\varepsilon_{ca}^+ \sigma_{\max}}{(n+1)\bar{\sigma}} \quad (16)$$

若在压应力时为:

$$\Delta \varepsilon_m^- = \frac{2\varepsilon_{ca}^- \sigma_{\min}}{(n+1)\bar{\sigma}} \quad (17)$$

在上、下保载的循环蠕变应变分别为:

$$\Delta \varepsilon_H^+ = \dot{\varepsilon}_{ca} t_H^+, \Delta \varepsilon_H^- = \dot{\varepsilon}_{ca} t_H^- \quad (18)$$

相邻两个循环迟滞回线图形中心距离为:

$$\dot{\varepsilon}_{cc} = \Delta \varepsilon_m^+ + \Delta \varepsilon_H^+ - \Delta \varepsilon_m^- - \Delta \varepsilon_H^-$$

整理得:

$$\dot{\varepsilon}_{cc} = \dot{\varepsilon}_{ca} \lambda_t \quad (19)$$

其中系数 λ_t :

$$\lambda_t = \frac{2\sigma_{\max}(1 \pm R^{n+1})}{\bar{\sigma}(n+1)} + t_H^+(1 \pm \frac{t_H^-}{t_H^+} R^n) \quad (20)$$

式(20)中,拉应力时取正号,压应力时取负号, $R = |\sigma_{\min}|/\sigma_{\max}$ 为应力比大小,将(19)式代入(13)式,得到:

$$\Delta W_c = \alpha_c \dot{\varepsilon}_{cc} \sigma_{\max} \quad (21)$$

其中系数 α_c 为:

$$\alpha_c = \chi_c / \lambda_t \quad (22)$$

在对称加载中 $\dot{\varepsilon}_{cc} = 0$,蠕变应变能密度增量用(13)式计算,在非对称加载中,因 $\dot{\varepsilon}_{cc}$ 易于实验测定,则用(21)式计算更为方便。式(13)与式(21)充分表达了多种损伤因素对蠕变应变能密度增量的影响。

2 疲劳-蠕变寿命计算式

因裂纹的扩展量是材料损伤的直观度量,裂纹从初

始长度 a_0 扩展到临界断裂长度 a_f 所经历的循环数 N_f 就是材料的寿命。由Saxena模型^[8],一个周期内的裂纹扩展是纯疲劳与蠕变二者的共同贡献,若取J积分为裂纹扩展的控制参量,则纯疲劳的J积分值为 $\Delta J_p = 2\pi Y^2 a \Delta W_p$,蠕变的J积分值为 $\Delta J_c = 2\pi Y^2 a \Delta W_c$,当考虑疲劳与蠕变的交互作用时,裂纹扩展速率表达式为^[9]:

$$da/dN = C_1 (\Delta J_p + \Delta J_c)^m = C_1 [2\pi Y^2 a (\Delta W_p + \Delta W_c)]^m \quad (22)$$

其中, a 是裂纹长度, N 是循环数, C_1 、 m 为材料常数, Y 为试件的几何形状因子,当忽略裂纹扩展对试件宏观形状影响时, Y 近似为常量。

由(22)式,对于两级加载,设第一级载荷稳定循环的有效应变能密度为 ΔW_{i1} ,循环次数为 N_1 ,裂纹长度从初始长度 a_0 到 a_1 ;设第二级载荷稳定循环的有效应变能密度为 ΔW_{i2} ,循环次数为 N_2 ,裂纹长度从 a_1 到临界断裂长度 a_f ;分离变量后:

$$C_2 [\Delta W_{i1}^m N_1 + \Delta W_{i2}^m N_2] = z \quad (23)$$

其中 $z = (a_0^{1-m} - a_f^{1-m})/(m-1)$ 在试件确定后为定值, $C_2 = C_1 (2\pi Y^2)^m$ 近似为常数。取 $C = C_2/z$,将(23)式简化为:

$$1 = C [\Delta W_{i1}^m N_1 + \Delta W_{i2}^m N_2] \quad (24)$$

且循环寿命:

$$N_f = N_1 + N_2 \quad (25)$$

其中 C 、 m 皆为材料常数,其值由实验测定。

式24、式25即为疲劳-蠕变寿命计算式,该式描述试件寿命的物理过程清晰,考虑了多种损伤因素对试件寿命的影响,也很便于推广到多级加载的情况。式(24)的物理意义为:若等号左边代表试件的总损伤量为100%,等号右边的各项则为各级加载对试件所造成的损伤占总损伤的百分比,当损伤累积到临界破坏所需数量时,试件就断裂。

3 寿命预测式(24)的验证

寿命预测验证的方法为:由单级加载实验拟合材料常数,因材料常数不应随载荷幅度变化而同样适用于多级加载,则得到两级加载的寿命计算式,然后将多级加载实验值与计算值比较二者相符合的程度。

3.1 拟合式(24)中的材料常数

用文献[10]报导的316L不锈钢圆棒形标准试件,在550℃下单级加载的疲劳-蠕变寿命实验数据来拟合式(24)的材料常数,实验的加载为非对称应力梯形

波,最大应力为 385 MPa 保持不变,改变最小应力值形成不同级的加载,周期为 12 s,加、卸载时间各为 1 s,上下保载段时间各为 5 s,每一级加载都到试件断裂为止。取参数 $n' \approx 0.42$, $K' = 3000.3 \text{ MPa}^{[7]}$, $n = 1.2855^{[11]}$,

非弹性应变由式(1)计算,有效应变能密度增量由式(2)与式(21)计算。单级加载下的实验数据与计算值见表 1。

表 1 单级加载 550 °C 下 316L 钢疲劳-蠕变实验数据与寿命预测值

应力 (MPa)		应变 (10 ⁻³)		有效面积系数		有效应变能密度增量 (10 ⁻⁵ MJ/m ³)			寿命 (cycle)	
最小 σ_{\min}^*	范围 $\Delta\sigma$	非弹性 $\Delta\varepsilon_p$	蠕变 α_p	疲劳(一) α_c	蠕变(10 ⁻⁵) ε_{cc}^*	疲劳 ΔW_p	蠕变 ΔW_c	总值 ΔW_t	计算值 N_{fc}	实验值 N_{fex}^*
-150	535	1.876	505	1.6046	31.47	506.848	194.412	701.26	628	690
-100	485	1.669	537	1.2619	29.86	434.683	145.069	579.75	982	776
-50	435	1.464	549	1.0403	12.65	349.625	50.665	400.29	2654	2808
0	385	1.267	582	0.9211	5.39	283.797	19.114	302.90	5608	5881
50	335	1.074	553	1.0203	14.10	198.964	55.387	254.35	8963	8731

注:物理量右上方标有“*”号的为实验值。

由表 1 数据拟合出(24)式的材料常数:

$$C = 4.3974 \times 10^{-3}, m = 2.6837 \quad (26)$$

则单级加载的疲劳-蠕变寿命计算式为:

$$N_f = 227.4 (\Delta W_t)^{-2.6837} \quad (27)$$

相关系数为 $R^2 = 0.9838$ 。

3.2 两级应力加载下的寿命预测

文献[12]报导了在与文献[10]相同实验条件下,两级加载的疲劳-蠕变寿命实验结果,由于单级与两级加载不应改变材料常数,则将(26)式直接代入(24)式,即

得到两级加载的疲劳-蠕变寿命计算式:

$$1 = 4.3974 \times 10^{-3} [\Delta W_{t1}^{2.6837} N_1 + \Delta W_{t2}^{2.6837} N_2] \quad (28)$$

两级加载实验也是保持最大应力为 385 MPa 不变,改变最小应力而形成的加载分级,对试件加载不同级别载荷的循环次数不同,各个试件加载直至断裂为止。当第 1、2 级载荷的应变能密度增量确定后,相应的循环次数 N_1 与 N_2 分配的关系式即为(28)式,实验数据与计算值皆列于表 2 中。

表 2 两级加载 550 °C 下 316L 钢疲劳-蠕变实验数据与寿命预测值

第 1 级加载				第 2 级加载		两级加载断裂		
最小有效应变能 $\sigma_{\min1}^*$ (MPa)	应力密度增量 ΔW_{t1} (10 ⁻³ MJ/m ³)	循环次数 N_1^* (cycle)	最小应力 $\sigma_{\min2}^*$ (MPa)	有效应变能密度增量 ΔW_{t2} (10 ⁻³ MJ/m ³)	循环次数 (cycle)		试件寿命 (cycle)	
					计算值 N_{2c}	实验值 N_2^*	计算值 N_{fc}	实验值 N_{fex}^*
-150	701.26	483	-50	400.29	481	624	964	1107
-150	701.26	345	-50	400.29	1102	1058	1447	1403
-150	701.26	207	-50	400.29	1723	1366	1930	1573
-50	400.29	1966	-150	701.26	152	95	2118	2061
-50	400.29	1040	-150	701.26	358	266	1398	1670
-50	400.29	842	-150	701.26	402	107	1244	949

注:物理量右上方标有“*”号的为实验值,物理量的右下角标数值表示加载的级次。

3.3 单级和两级加载的寿命预测图

由表 1、表 2 中的疲劳-蠕变寿命实验值与计算值,作出 316L 钢在 550 °C 下单级和两级加载的疲劳-蠕变寿命预测图如图 3 所示。

由表 1 与表 2 中的实验寿命与计算寿命值及图 3 可知,计算值与实验值的偏差皆在 ± 0.5 倍计算值之内,寿命预测的精度较高。即基于裂纹扩展的两级加载疲劳-蠕变寿命预测(28)式与实验值符合较好。

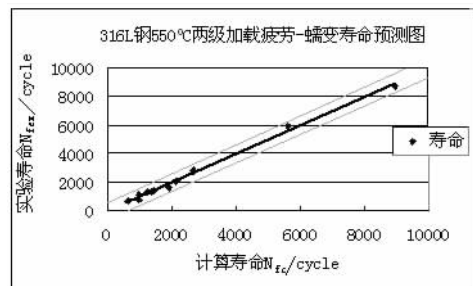


图 3 两级载荷加载下的疲劳-蠕变寿命预测图

4 结 论

(1) 从裂纹扩展致使试件断裂的角度描述两级加载下的疲劳-蠕变的寿命演化过程,物理过程清晰明了。

(2) 选取有效应变能密度为损伤变量,导出的疲劳-蠕变的寿命计算式能反映出多种损伤因素对寿命的影响,应用的局限性较小。

(3) 利用压应力会使迟滞回线正面积增大这一现象,定量描述了压应力对裂纹扩展的贡献。

(4) 导出的疲劳蠕变寿命计算式可应用于多级加载,寿命预测的精度较高。

参 考 文 献:

- [1] 陈凌,蒋家玲,范志超,等.低周疲劳寿命预测的能量模型探讨[J].金属学报,2006,42(2):195-200.
- [2] Kim T W,Kang D H,Yeom J T,et al.Continuum damage mechanics-based creep-fatigue-interacted life prediction of nickel-based superalloy at high temperature[J].Scripta Materialia,2007,57(12):1149-1152.
- [3] 陈学东,范志超,江惠丰,等.复杂加载条件压力容器典型用钢疲劳蠕变寿命的预测方法[J].机械工程学报,2009,45(2):81-87.
- [4] Jeong C Y,Choi B G,Nam S W.Normalized life prediction in terms of stress relaxation behavior under creep-fatigue interaction[J].Materials Letter,2001,49(1):20-24.
- [5] 范志超,陈学东,陈凌.基于延性耗竭理论的疲劳蠕变寿命预测方法[J].金属学报,2006,42(4):415-420.
- [6] 于强.应力梯形波加载下循环蠕变曲线函数的确定[J].四川理工学院学报:自然科学版,2013,26(3):82-83.
- [7] 陈年金.高温环境中疲劳蠕变交互作用寿命预测方法研究[D].浙江:浙江工业大学,2006.
- [8] Saxena A.A model for predicting the effect of frequency on frequency on fatigue crack growth behavior at elevated temperature[J].Fatigue Eng Master Strut,1981,3(3):247-255.
- [9] 于强.疲劳与蠕变交互作用下的裂纹扩展速率的探讨[J].机械强度,2013,35(5):129-132.
- [10] 张莉,江惠丰,江恒.同加载条件下316L不锈钢的疲劳蠕变行为研究[J].压力容器,2008,25(7):7-9.
- [11] 徐尹杰.316L不锈钢单轴棘轮蠕变行为研究[D].成都:西南交通大学,2006.
- [12] 董杰,陈学东,范志超,等.高温316L钢非线性疲劳蠕变损伤演化模型及其应用[J].机械强度,2011,33(4):587-589.

Prediction of Fatigue-Creep Life Based on Crack Propagation Under 2-step Load

YU Qiang

(School of Science, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China)

Abstract: By taking the increment of strain energy density under tensile stress within a cycle as the damage variable of the material, and according the positive acreage enclosed by hysteresis loops, the equation of the damage variable can be educed. In view of the fact that the damage of material would result in fatigue crack propagation and fatigue crack propagation would cause the crack of specimens, J-integral is considered as the control parameter during crack growth process, crack growth is regarded as the contribution of fatigue damages as well as creep damage, the interaction of the two factors is considered, then the equation of Fatigue-Creep Life under 2-step stress load is educed; the equation is relative to loading waveform and fatigue-creep rate. The equation is applied to predict fatigue-creep life of 316L steel, at 550 °C under 2-step load of strain trapezoidal wave. The prediction is proved to be satisfactory with an error factor of ± 1.50 times.

Key words: stain energy density; 2-step load; crack growth; fatigue-creep; life prediction